

[Research Paper]

## FDS 기반의 연기감지기 예측모델을 위한 입력인자 재검토

장효연 · 황철홍<sup>†</sup>

대전대학교 소방방재학과

## Revision of the Input Parameters for the Prediction Models of Smoke Detectors Based on the FDS

Hyo-Yeon Jang · Cheol-Hong Hwang<sup>†</sup>

Department of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University

(Received March 6, 2017; Revised March 28, 2017; Accepted March 29, 2017)

### 요 약

성능위주 소방설계(PBD)의 과정에서 요구피난시간(RSET) 산정의 신뢰성을 확보하기 위해서는 화재시물레이션을 이용한 정확한 연기감지기 작동시간 예측이 필수적이다. 본 연구의 목적은 FDS 기반의 연기감지기 수치모델에서 요구되는 입력인자의 정확도를 개선시키는 것이다. 이를 위하여 선행연구에서 적용된 화재감지기 시험장치(FDE)의 개선이 이루어졌다. 구체적으로 FDE 내부의 유동 및 연기농도 균일성이 개선되었으며, 연기입자의 전방산란 저감을 통해 감지기가 작동되는 순간의 정확한 광 소멸률이 측정되었다. 개선된 FDE를 이용한 입력인자는 기존 결과와 정량적으로 상당한 변화를 보이고 있으며, 이온화식 감지기에 비해 광전식 감지기에서 더 큰 차이가 확인되었다. 연기감지기의 작동조건은 감지기 종류, 가연물, 연기입자 및 색상에 따라 큰 차이가 발생됨을 고려할 때, PBD의 신뢰성을 향상시키기 위하여 향후 연구에서는 보다 다양한 감지기 및 가연물에 대한 입력인자 DB가 구축되어야 할 것이다.

### ABSTRACT

Accurate predictions of the activation time for smoke detectors using a fire simulation are required to ensure the reliability of the RSET (Required Safe Egress Time) calculation in the process of PBD (Performance-Based Design). The objective of this study was to enhance the accuracy of input parameters for the numerical models of smoke detector based on the FDS. To this end, a Fire Detector Evaluator (FDE) developed in previous studies was improved. The uniformities of flow and smoke inside the FDE were improved and accurate measurements of the obscuration per meter (OPM) related to detector operation were also performed through a decrease in the forward scattering of smoke particles. The input parameters using the improved FDE showed a significant difference from the previous FDE quantitatively. In particular, a larger difference was found in a photoelectric detector compared to an ionization detector. Considering that the operating conditions of smoke detectors are affected by the detector type, combustibles, smoke particulars, and color, the database (DB) on the input parameters for various detectors and combustibles should be built to improve the reliability of PBD in future studies.

**Keywords :** Fire Dynamics Simulator (FDS), Fire Simulation, Smoke Detector, Performance-Based Design (PBD)

### 1. 서 론

최근 건축물의 고층화, 복합화 및 대형화에 따른 높은 화재 위험성으로 인한 기존 법규 중심의 소방설계 한계를 극복하기 위하여, 국내에서는 2011년 7월부터 ‘소방시설공사업법’에 의해 건축물의 연면적, 높이 및 층수에 따라 선정된 특정소방대상물을 신축하는 경우, 용도, 위치, 구조, 수용인원, 가연물의 종류 및 양 등을 고려하여 성능위주설계(Performance-Based Design, PBD)를 시행하고 있다. PBD는

화재안전의 목적과 설계목표의 이해를 시작으로 화재발생 및 성장과 관련된 화재의 특성평가 그리고 최종 정량적 근거에 의한 화재안전성 평가를 통해 이루어진다. 화재안전성 평가는 일반적으로 Timeline 분석에 근거하여 화재로 인하여 거주자가 위험상태에 도달하는 허용피난시간(Available Safe Egress Time, ASET)과 거주자가 안전한 곳으로 피난하는데 소요되는 요구피난시간(Required Safe Egress Time, RSET)의 비교를 통해 이루어진다. 예를 들어 ASET이 RSET에 비해 클수록 화재로부터 보다 안전한 건축물로 평가될 수 있

<sup>†</sup> Corresponding Author, E-Mail: [chewang@dju.ac.kr](mailto:chewang@dju.ac.kr), TEL: +82-42-280-2592, FAX: +82-42-280-2596

© 2017 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

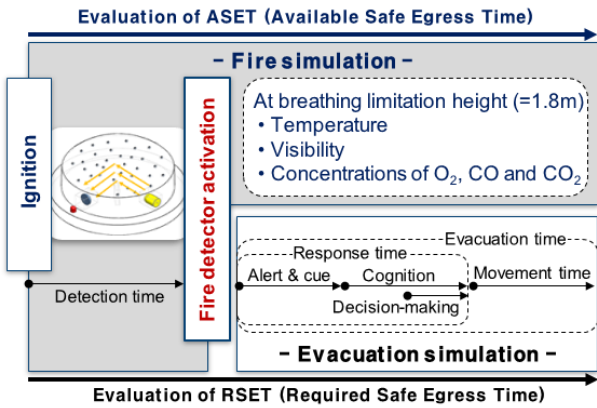


Figure 1. Prediction of fire detector activation for the reliable PBD.

다<sup>(1)</sup>. 그 결과 이러한 방법에 의한 화재안전성 평가의 신뢰성을 확보하기 위해서는 우선적으로 ASET과 RSET의 정확한 산정이 이루어져야 한다.

ASET의 산정은 PBD의 목적에 따라 위험도가 높은 공간 및 화재시나리오를 대상으로 화재시뮬레이션의 수행 및 결과분석을 통해 이루어진다. 이때 적용되는 정량적 성능기준으로는 연층의 높이와 관련된 호흡 한계선(1.8 m), 열(60 °C) 및 가시거리에 의한 영향, 독성(CO 1,400 ppm, O<sub>2</sub> 15% 이상, CO<sub>2</sub> 5% 이하)에 의한 영향과 같은 인명 안전기준이 적용되고 있다. 물론 정확한 ASET을 예측하기 위해서는 화재모델링이 갖는 본질적인 예측 불확실도에 대한 이해와 더불어, 수치결과의 검증 및 해석기법의 체계화에 관한 연구가 동반되어야 한다<sup>(2)</sup>. RSET의 산정은 감지시간(Detection time), 반응시간(Response time) 그리고 피난행동시간(Movement time)의 합으로 도출된다<sup>(3)</sup>. 이때 반응시간 및 피난행동시간의 산정은 피난시뮬레이션 또는 다양한 이론을 통해 이루어진다. Figure 1은 ASET과 RSET의 산정을 위하여 화재 및 피난시뮬레이션의 역할을 도식화한 것이다. 화재발생 이후 연기 또는 열감지의 작동시간을 의미하는 감지시간은 RSET의 산정에 포함되지만, 화재시뮬레이션의 결과를 통해 얻어짐을 그림을 통해 확인할 수 있다. 그 결과, 감지기의 작동시간 예측은 RSET의 산정과 직접적으로 연관되며, 동시에 다양한 화재 시나리오에 따른 화재시뮬레이션의 예측정확도에 영향을 받게 된다. 특히 화재모델링에 포함되어 있는 연기 및 열감지기 수치모델의 입력인자는 정확한 감지기 작동시간 예측, RSET의 산정 그리고 최종적으로 화재안전성 평가기법의 신뢰성 확보에 매우 중요한 핵심 정보라 할 수 있다.

화재시뮬레이션의 검증에 관한 연구는 주로 열발생률, 온도, 열유속 그리고 CO와 같은 연소생성물의 농도에 초점을 두고 있으며, 화재 감지기의 작동조건 및 작동시간에 관한 불확실도 연구 및 입력인자 DB 구축에 관한 연구는 거의 수행되지 않은 실정이다. 최근 본 연구진은 연기 및 열감지기의 장치물성을 측정하기 위한 시험장치(Fire Detector

Evaluator, FDE)를 제작하였으며, 이를 통해 국내 PBD에 널리 적용되고 있는 화재모델인 FDS(Fire Dynamics Simulator, FDS) 기반의 연기 및 열 감지기 수치모델 입력인자 값을 제시한바 있다. 구체적으로 국내에 적용되는 이산화탄소 및 광전식 연기감지기를 대상으로 작동시간 예측이 가능한 Heskestad 및 Cleary 수치모델의 입력인자를 측정하였다<sup>(4,5)</sup>. 또한 써미스터 및 바이메탈 방식의 정온식 열감지기에 대한 작동온도 및 RTI 등의 입력인자를 측정하는 바 있다<sup>(6)</sup>. 실험을 통해 얻어진 장치물성이 직접 적용된 화재시뮬레이션 결과는 FDS의 초기 설정값(Default)이 적용된 결과와 비교할 때, 동일한 화재조건에서도 감지기 작동시간의 매우 큰 차이가 발생됨을 정량적으로 확인하였다.

본 연구에서는 선행연구에서 검토된 동일한 이산화탄소 및 광전식 연기감지기를 대상으로, 정량적으로 보다 정확한 FDS 기반의 연기감지기 수치모델의 입력인자를 도출하기 위하여 기존의 FDE가 개선되었다. 구체적으로 수치모델에서 요구되는 입력인자에 큰 영향을 미치는 유동 균일화, 감지기로 유입되는 기류의 유속 및 단위 길이당 광 소멸률(Obscuration Per Meter, OPM)의 측정 정확도가 개선되었다. 이를 통해 얻어진 수치모델 입력인자는 선행연구 결과와 정량적으로 차이를 갖고 있으며, 이에 본 논문을 통해 선행연구결과의 수정·보완된 정보를 제공하고자 한다. 본 연구결과는 화재시뮬레이션을 이용한 감지기 작동시간의 정확한 예측 및 RSET의 산정을 통해 국내 PBD의 신뢰성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

## 2. FDS 기반의 연기감지기 수치모델의 고찰

연기감지기의 작동시간 예측을 위하여 FDS에는 Heskestad 모델과 Cleary 모델이 적용되고 있다. 이들 모델은 시간지연법(Time lag method)으로 분류되며, 감지기 입구의 형상에 의한 연기 유입저항(Smoke entry resistance)을 고려하여, 감지기 외부와 감지기 내부(Housing과 Sensing chamber로 구성)의 연기농도가 특정 시간차이를 갖는다는 아래의 개념이 적용된 것이다<sup>(7,8)</sup>.

$$\Delta t_{lag} = t_{th, sen} - t_{th, ext} \tag{1}$$

여기서,  $\Delta t_{lag}$ 는 시간지연을 의미하며,  $t_{th, sen}$ 는 연기가 감지기 내부의 센서에 도달하는 시간,  $t_{th, ext}$ 는 감지기 외부에 도달하는 시간을 나타낸다.

Heskestad 모델<sup>(9)</sup>은 연기가 감지기를 통과하여 이동하는 유효거리인 특성길이(Characteristic length,  $L$ )를 자유흐름속도(Free stream velocity,  $U$ )로 나눈 특성시간( $L/U$ )을 통해 다음과 같은 일차 정확도의 식에 의해 감지기가 작동한다.

$$\frac{dY_c}{dt} = \frac{Y_c(t) - Y_c(t)}{L/U} \tag{2}$$

여기서 감지기 내부의 연기농도  $Y_c$ 와 연기층의 연기농도  $Y_e$  사이에  $\delta t = L/U$  만큼의 시간지연이 존재하게 된다. 따라서  $Y_c$ 가 지정된 임계값을 초과하게 되면 감지기는 작동하게 된다.

Cleary 모델<sup>(10)</sup>은 Heskestad 모델에 감지기 내부의 혼합시간을 추가한 것으로서, 감지기 내부를 플러그류(Plug flow)와 센서 내의 완전혼합류(Perfectly stirred flow)로 구분하여 총 지연시간을 Dwell time ( $\delta t$ )과 Mixing time ( $\tau$ )의 합으로 표현한 것이다. Cleary 모델에서  $\delta t$ 는 특성시간의 단일변수를 통해 감지기의 작동여부를 판단하는 Heskestad 모델의 시간지연 값과 개념적으로 동일한 의미를 갖는다. Cleary는 식 (3)을 적용하여 감지기의 형상이나 내부유동에 의해 발생할 수 있는 지연시간을 고려하였다.

$$\delta t = \alpha_c U^{\beta_c}, \tau = \alpha_c U^{\beta_c}, \Delta t = \delta t + \tau \quad (3)$$

위 식에서  $\delta t$ 는 연기가 감지기의 Housing을 채우는데 걸리는 특성시간(즉, 유입시간),  $\tau$ 는 연기입자의 감지기 내부 혼합시간(Sensing chamber를 채우는데 요구되는 특성시간) 그리고  $\Delta t$ 는 감지기의 총 반응 지연시간을 의미한다. 또한  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 연기감지기의 형상과 관련된 실험상수로서 연기입자의 유입 및 혼합을 고려하기 위해 경험적으로 결정되는 상수이다.

Heskestad 및 Cleary 모델에서 공통적으로 요구되는 입력인자로서, 식 (4)와 같이 표현되는 감지기 작동이 개시되는 단위 길이당 광 소멸률인 OPM(%/m)의 정보가 요구된다.

$$OPM = [(1 - (I/I_0)^{1/L_p})] \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

위 식에서  $I/I_0$ 는 연기입자에 의해 소멸되는 입사광의 강도 비를 의미하며,  $L_p$ 은 레이저 광의 경로거리(Path length)를 각각 의미한다. Cleary 모델에 비해 비교적 간단한 Heskestad 모델은 연기류의 유속이 충분히 높은 조건에서는 비교적 정확하지만, 낮은 천장 제트류(Ceiling jet flow)를 갖는 연기 유속 범위에서는 단일 특성길이의 변수만을 통해 정확한 감지기 작동여부를 판단하는 데는 한계가 있다고 알려져 있다<sup>(11)</sup>. 감지기 외부의 상류 위치에서 측정되는 광학적 연기밀도(Optical smoke density, OD)와 감지기 내부 회로에서 측정되는 감지기 신호를 이용하여 Heskestad ( $L$ ) 및 Cleary 모델의 입력인자( $\alpha_c, \beta_c, \alpha_c, \beta_c$ ) 그리고 공통적 입력인자 OPM을 도출하는 상세한 방법은 선행연구 논문<sup>(4,5)</sup>에서 확인될 수 있다.

### 3. FDE의 개선 및 성능평가

#### 3.1 FDE의 개선내용

본 연구에서 검토된 이온화식 및 광전식 연기감지기는 선행연구<sup>(4,5)</sup>에서 적용된 모델과 동일한 것으로서, T사에서

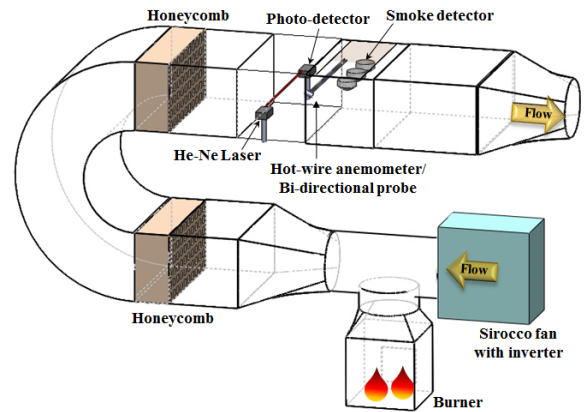


Figure 2. Schematic of previous Fire Detector Evaluator (FDE).

생산되는 2중/보통형/비방수형/재용형/비축척형이다. 연기 감지기 수치모델의 입력인자를 도출하기 위한 FDE(Fire Detector Evaluator)는 크게 공기 공급장치, 연기 발생장치, 유량 분배장치, 온도, 유속 및 광학적 연기밀도 측정을 위한 장치들로 구성되어 있다. FDE의 단면은 0.6 m×0.3 m로 제작되었으며, 분해 및 조립의 편의를 위하여 0.3 m 또는 0.15 m 길이의 사각 덕트 플랜지로 체결되었다. Figure 2는 선행연구를 통해 제작된 FDE의 개략도이다. 공기 공급장치로서 시로코 팬(Sirocco fan)이 블로워로 사용되었으며, 인버터를 이용한 팬의 회전속도 조절과 댐퍼(Damper)를 이용하여 최종 공급 유량이 변화되었다. 연기의 발생은 공기 유입구, 다공판 및 변형된 알칼 램프 용기로 구성된 버너를 통해 이루어졌으며, 이때 연료는 헵탄이 사용되었다. 장치 내부의 유동 균일화를 위하여 사각 덕트 내부에 하니컴이 설치되었다. 상부로의 개방문이 설치된 덕트 천장 근처에 3개의 연기감지기가 설치되었다. 또한 감지기 연기 유입구의 수직 높이에 맞추어 천장근처에서 유속과 광학적 연기밀도가 측정되었다. 유속 측정에는 열선유속계(TESTO 480)가 사용되었으며, 비교적 높은 연기농도 및 유속의 조건에서는 차압센서를 통해 보정된 양방향 유속계(Bi-directional velocity probe)가 동시에 사용되었다. 광학적 연기밀도의 측정을 위하여 광소멸법(Light extinction method)<sup>(12)</sup>이 적용되었다. 광원으로는 10 mW He-Ne 레이저가 사용되었으며, 광학장치 내로의 연기 유입을 방지하기 위하여 1 L/min의 N<sub>2</sub>가 공급되었다. 광소멸법의 광학배열 및 상세한 원리는 참고문헌<sup>(13)</sup>을 통해 확인할 수 있다. 감지기는 P형 수신기와 연결시켜 전원을 공급하였으며, 내부 회로의 접점으로부터 연기유입에 따른 출력신호가 실시간 측정되었다. 광학적 연기밀도, 차압 및 감지기 내부 신호는 모두 전압으로 출력되며, DAQ (Graphtec, GL820)를 이용하여 실시간 기록되었다.

Figure 3은 개선된 FDE의 개략도 및 측정구간의 상세 개략도를 도시한 것이다. 선행연구에서 사용된 FDE와의 차이점은 크게 3가지로 요약될 수 있다. 첫째, 장치 내부의 유동 균일성을 개선시키기 위하여 추가적인 메쉬층이 설치

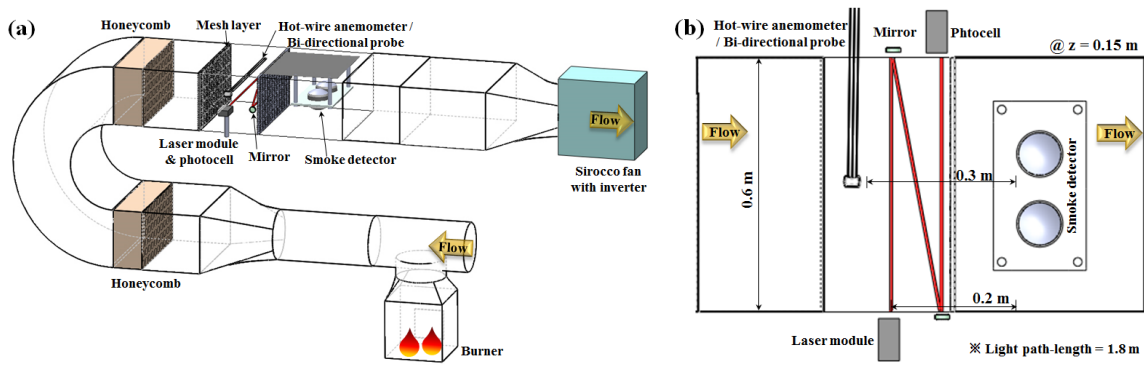


Figure 3. Schematics of advanced FDE and test section.

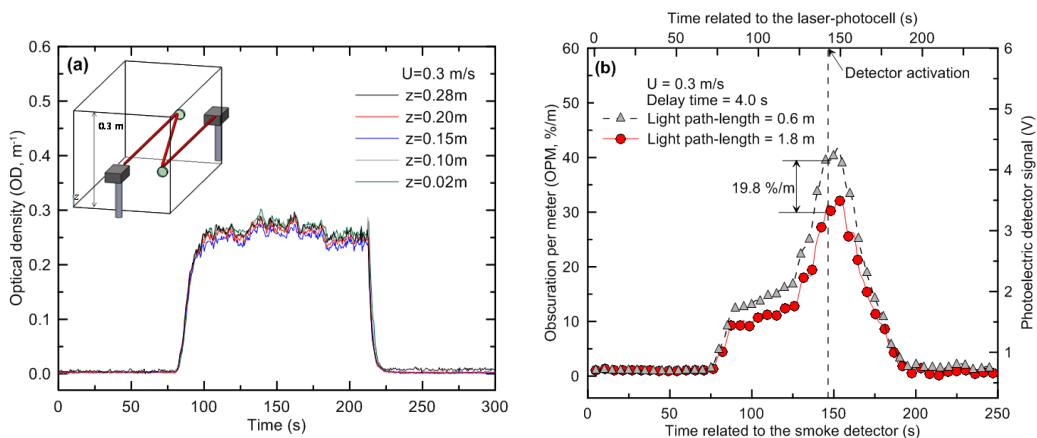


Figure 4. Uniformity of smoke optical density and OPM with the change in the path-length of light in the advanced FDE.

되었다. 또한 속도 변동으로 인한 난류강도를 감소시키기 위하여 시로코 팬의 위치변경을 통해 기존의 Blow type이 아닌 Suction type으로 변경되었다<sup>(14)</sup>. 둘째, 기존에 천장 근처에 설치된 감지기, 유속 및 광학적 연기밀도 측정 위치를 덕트의 수직높이 중앙( $z=0.15\text{ m}$ )으로 변경되었다. 일반적으로 감지기는 구획 천장에 설치되어 연기의 천장제트 유동(Ceiling jet flow)에 의해 작동됨을 고려할 때, 기존 장치에서와 같이 감지기를 천장에 설치하는 것은 타당한 선택이라 할 수 있다. 그러나 감지기 수치모델의 입력인자를 측정할 때 요구되는 중요한 물리량인 유속 및 광학적 연기밀도에 대한 정확한 측정에는 상당한 어려움을 가져올 수 있다. 즉, 천장의 벽면 근처에서 형성되는 속도 경계층으로 인하여, 본 연구에서 적용된 풍속 프로브(9 mm) 또는 양방향 유속계(14 mm)의 큰 직경으로는 감지기 연기 유입구 근처의 정확한 유속을 측정하기 어렵다. 또한 덕트 내부의 유속이 균일하더라도 화원에서 공급된 연기류의 온도가 높은 경우에는 연기유동의 성층화(Stratification)로 인하여 상대적으로 천장 근처에 연기가 밀집되는 문제가 발생될 수 있다. 이에 개선된 FDE에서는 감지기의 설치 위치를 덕트 수직높이 중앙에 위치하였으며, Figure 3(b)에서와 같이 유속 및 연기의 광학밀도 측정 위치도 동시에 변경되었다. 마

지막으로 광소멸법의 정확한 원리를 구현하기 위하여, 레이저 광의 경로거리  $L_p$ 를 기존의 0.6 m에서 1.8 m로 변경하였다. 광의 경로를 통과하는 연기 입자에 의해 광은 흡수 및 산란으로 인하여 소멸되며, 통과되는 광의 세기만의 측정을 통해 소멸되는 광의 비율을 확인할 수 있다. 그러나  $L_p$ 가 짧은 경우에는 연기입자에 의해 산란된 광이 레이저의 수광부로 유입될 수 있어 실제 통과되는 광보다 높게 측정될 수 있다. 이러한 전방산란(Forward scattering)을 최소화시키기 위하여 Z자 형상을 통해 광의 경로를 증가시켰다<sup>(11)</sup>. 또한 기존 FDE에서는 고가의 He-Ne 레이저와 광 감지기(Photo detector)가 사용되었으나, 높이별 다양한 위치에서 광학적 연기밀도의 균일성을 평가하기 위하여 동일한 광소멸법이 적용된 저가의 장치가 적용되었다. 저가형 광학적 연기밀도 측정장치는 레이저 모듈과 포토셀(Photocell)을 이용하는 방법으로서, 기존 장치와 동일한 계측성능을 갖고 있다. 이에 대한 상세한 장치설명은 본 연구진에 의해 수행된 선행연구<sup>(15)</sup>에서 확인될 수 있다.

### 3.2 개선된 FDE의 성능평가

개선된 FDE의 성능을 평가하기 위하여, 측정구간에서 연기농도의 균일성 및  $L_p$ 에 따른 감지기 작동기준인 OPM

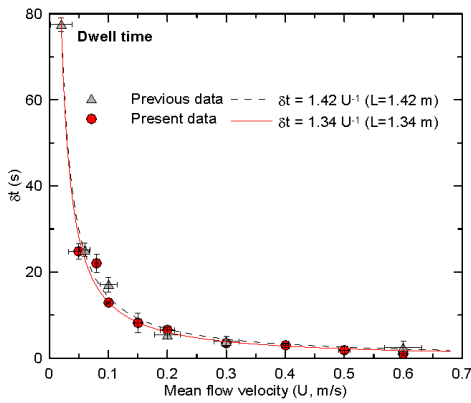


Figure 5. Dwell times for the characteristics length (L) in Heskestad model with ionization smoke detector.

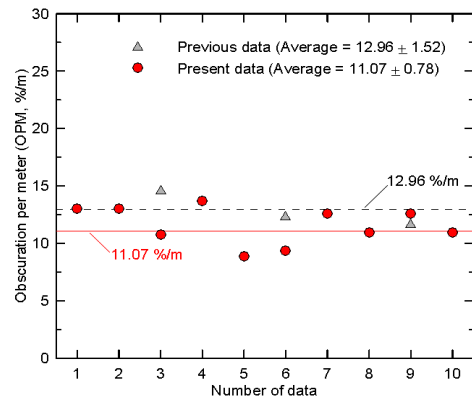


Figure 7. Obscuration per meter (OPM) for the ionization detector activation.

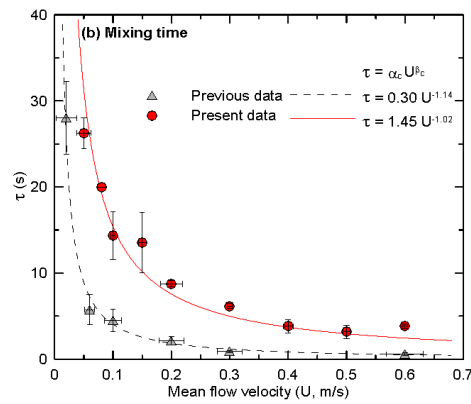
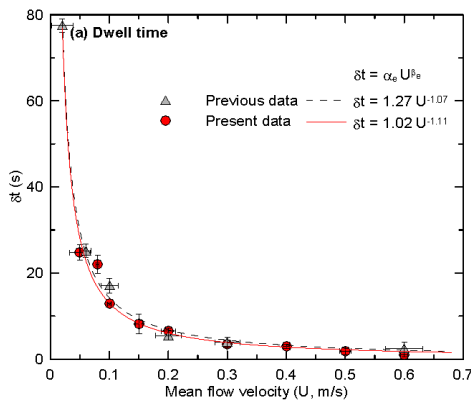


Figure 6. Dwell times and mixing times for the parameters in Cleary model with ionization smoke detector.

의 변화를 확인하였다. Figure 4(a)는 사각 덕트의 수직 높이에 따른 광학적 연기밀도(OD)를 비교 도시한 것이다. 입의 연기농도가 유입될 때 0.02 m~0.28 m의 높이에서 측정된 OD는 시간에 따라 매우 유사함을 볼 수 있다. 즉, 덕트 내부의 연기농도 균일성을 통해 개선된 FDE의 유동 균일성뿐만 아니라 연기의 성층화를 차단시키기 위한 최소 온도 상승이 가능한 연기발생장치가 적절하게 적용되었음을 동시에 확인할 수 있다. Figure 4(b)는 광전식 감지기를 대상으로  $L_p$  변화에 따른 OPM을 시간에 따라 도시한 결과이다. 감지기가 작동되는 OPM을 비교해보면,  $L_p$ 가 기존의 0.6 m인 경우 약 40 %/m에서 감지기가 작동되는 것으로 측정된다. 그러나  $L_p$ 가 1.8 m로 증가된 경우에 작동되는 OPM이 19.8% 감소됨을 볼 수 있다. 이를 통해 기존장치에서 적용된  $L_p=0.6$  m의 조건에서는 상당한 전방산란이 발생되어, 실제보다 높은 OPM이 측정되었음을 알 수 있다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 이온화식 감지기 수치모델의 입력인자 재검토

Figures 5~7은 이온화식 연기감지기를 대상으로 FDS 기반의 Heskestad 및 Cleary 수치모델 입력인자들의 측정결과

를 도시한 것이다. Figure 5는 평균 유속변화에 따라 Heskestad 모델 개념을 통해 산출된 Dwell time을 도시한 것으로, 기존 및 개선된 FDE의 측정결과를 비교한 것이다. 각 심볼에 표기된 수평 및 수직 Error bar는 평균유속 및 측정값의 표준편차를 각각 의미한다. 회귀선을 통해 최종 산출된 특징길이(L)를 살펴보면, 개선된 FDE에서  $L=1.34$  m로서 기존 장치에 비해 약 6% 감소되었음을 알 수 있다.

Figure 6은 평균 유속의 변화에 따라 Cleary 모델 개념을 통해 산출된 Dwell time ( $\delta t$ )과 Mixing time ( $\tau$ )을 비교·도시한 결과이다. Dwell time은 Heskestad 모델과 동일한 실험결과를  $\alpha_c U^\beta$ 의 형태로 표현한 것으로서, Figure 5에서와 같이 기존 및 개선된 FDE의 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 Mixing time의 경우에, 개선된 FDE는 기존에 비해 보다 증가된 시간이 측정되었으며, 그 결과  $\alpha_c U^\beta$ 로 표현되는 입력인자의 큰 차이가 있음을 확인할 수 있다.

Figure 7은 FDS의 입력인자인 ACTIVATION\_OBSCURATION에 해당되는 값으로서, 감지기가 작동되는 광 소멸률인 OPM을 측정한 결과이다. 연기 농도를 점차적으로 증가시켜 감지기가 작동되는 순간(내부 임피던스의 증가로 수신기 전압의 급격한 강하)에 측정되었다. 이에 대한 보다 자세한 내용은 참고문헌<sup>(4)</sup>을 통해 확인할 수 있다. 기존 FDE

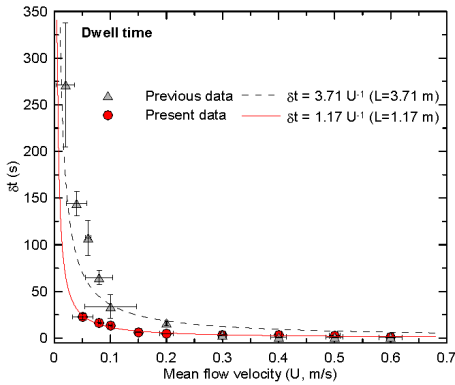


Figure 8. Dwell times for the characteristics length (L) in Heskestad model with photoelectric smoke detector.

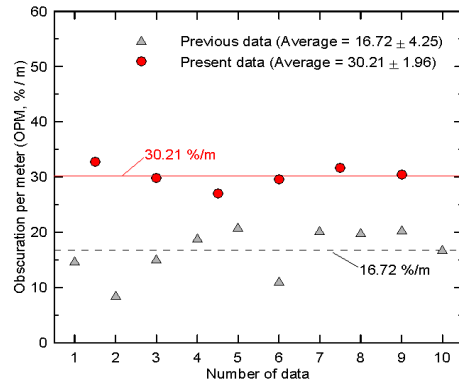


Figure 10. Obscuration per meter (OPM) for the photoelectric detector activation.

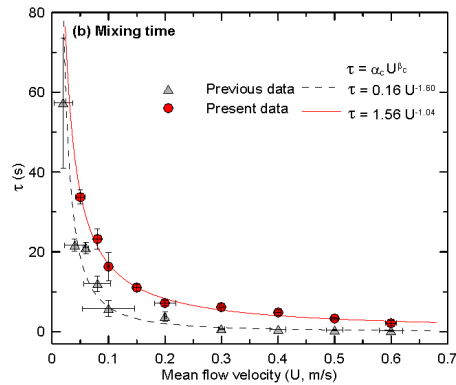
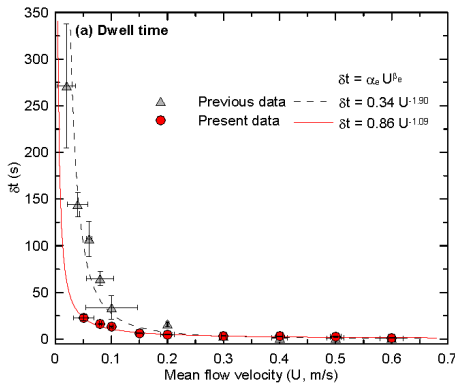


Figure 9. Dwell times and mixing times for the parameters in Cleary model with photoelectric smoke detector.

에서는 평균 OPM이 12.96 %/m로 측정된 반면에, 개선된 FDE에서는 11.07 %/m로 측정되었다. 또한 개선된 FDE를 이용한 실험에서는 측정 횟수의 증가를 통해 측정값의 신뢰도를 개선시켰다.

#### 4.2 광전식 감지기 수치모델의 입력인자 재검토

Figures 8~10은 광전식 연기감지기를 대상으로 Heskestad 및 Cleary 수치모델 입력인자들의 측정결과를 도시한 것이다. Figure 8은 평균 유속변화에 따라 Heskestad 모델 개념을 통해 산출된 Dwell time을 도시한 것으로, 기존 및 개선된 FDE의 측정결과를 비교한 것이다. 회귀선을 통해 최종 산출된 특정길이(L)를 살펴보면, 개선된 FDE에서 L=1.17 m로서 기존 장치에 비해 약 70% 크게 감소되었음을 알 수 있다. 이 결과는 Figure 5의 이온화식 감지기와 비교할 때, 개선된 FDE의 적용은 이온화식에 비해 광전식 감지기의 입력인자 측정에 더 큰 변화를 가져옴을 확인할 수 있다.

Cleary 모델 개념을 통해 산출된 Dwell time ( $\delta t$ )과 Mixing time ( $\tau$ )이 도시된 Figure 9를 살펴보면, 개선된 FDE에서 측정된 Dwell time의  $\alpha_e$ 와  $\beta_e$ 는 기존 FDE와 비교할 때 큰 변화가 있음을 볼 수 있다. Mixing time과 관련된 입력인자  $\alpha_c$ 와  $\beta_c$  역시 개선된 FDE의 값은 기존에 비해 상당

한 차이를 보이고 있다. 이러한 결과들의 차이는 3장에서 설명되었듯이, 개선된 FDE에서 구현된 유동 균일성의 개선 및 보다 정확한 감지기 입구 근처의 유속 측정에 의해 발생된 것으로 판단된다.

Figure 10은 광전식 감지기가 작동되는 순간의 OPM을 비교·도시한 것이다. 기존 FDE에서는 평균 OPM이 16.72 %/m인 반면에, 개선된 FDE에서는 30.21 %/m로서 크게 증가되었다. 3.2절에서 언급되었듯이 개선된 FDE에서는  $L_p$ 가 0.6 m에서 1.8 m로 크게 증가되어 동일 조건에서 OPM이 감소되었다. 그럼에도 불구하고, 개선된 FDE에서 평균 OPM이 기존에 비해 크게 증가된 이유는 측정된 Dwell time과 연관된 유속측정의 차이에서 발생된 것으로 판단된다. 또한 Figure 7의 이온화식 감지기와 비교할 때, 큰 차이를 보이는 이유는 헬탄 연료를 통해 발생하는 검정색 연기(Black smoke)의 특성과 관련된 것으로서, 이에 대한 상세한 내용은 Table 1을 통해 설명될 것이다.

Table 1은 이온화식 및 광전식 연기감지기에 대한 FDS 기반의 Heskestad 및 Cleary 모델의 입력인자를 재정리한 결과이다. 각 입력인자에 대하여 FDS 내에 포함되어 있는 Default 값과 기존 및 개선된 FDE를 통해 측정된 값을 비교하였다. 많은 국내 PBD 설계에 적용되고 있는 Default 값은

**Table 1.** Input Parameters for the Models of Smoke Detector Based on FDS

		Ionization Smoke Detector			Photoelectric Smoke Detector			
		Default	Previous	Present	Default	Previous	Present	
Heskestad Model	Length (L, m)	1.8	1.42	1.34	1.8	3.71	1.17	
Cleary Model	Dwell Time	$\alpha_e$	1.8	1.27	1.02	1.8	0.34	0.86
		$\beta_e$	-1.0	-1.07	-1.11	-1.1	-1.90	-1.09
	Mixing Time	$\alpha_c$	1.0	0.30	1.45	1.0	0.16	1.56
		$\beta_c$	-0.8	-1.14	-1.02	-0.8	-1.60	-1.04
Obscuration Per Meter (OPM, %/m)		3.24	12.96±1.52	11.07±0.78	3.24	16.72±4.25	30.21±1.96	

국내에 사용되는 감지기의 입력인자와는 매우 큰 차이를 보이고 있다. 또한 기존 FDE를 통해 도출된 입력인자는 개선된 FDE의 결과와 비교할 때, 무시될 수 없는 오차가 포함되었음을 확인할 수 있다. 특히 이온화식에 비해 광전식 감지기의 입력인자에 더욱 큰 차이가 발생되었다. 이의 원인은 본 연구에서 적용된 헵탄 연료의 검정색 연기와 이온화식 및 광전식 감지기의 작동원리의 차이를 통해 설명될 수 있다.

이온화식 감지기는 감지기의 안과 밖에 2개의 이온실이 있고, 양이온실 내부의 공기는 일정 전압에 의한 라듐의 방사선으로 이온화되어 있다. 화재로부터 발생한 연기가 외부 이온실에 유입되면 연기입자에 이온이 흡착되어, 최종 이온전류가 감소되고 내·외실의 이온전류 차이로 인하여 감지기가 작동된다. 이때 동일한 연기농도의 조건에서 흰색 연기에 비해 검정색 연기가 유입될 때 이온화식 감지기는 조기에 작동된다. 이는 수분이 주성분인 흰색 연기에 비해 탄소입자로 구성된 Soot을 포함한 검정색 연기가 통전성이 높기 때문이다. 반면에, 광전식 감지기는 유입되는 연기입자의 산란광에 의해 포토셀에 일정량 이상의 광이 유입되면 작동되는 원리가 적용된다. 그 결과 광의 높은 산란성을 갖는 흰색 연기에 매우 민감하게 반응하는 반면에, 광의 산란보다는 흡수가 지배적인 검정색 연기에는 매우 느리게 반응하는 특성을 갖게 된다. 그 결과 동일한 2종 보통형의 감지기가 적용되었음에도 개선된 FDE에서 측정된 이온화식 및 광전식 감지기의 OPM의 큰 차이가 발생되고 있다. 종합적으로 측정장치 내부의 유속 및 연기농도의 균일도가 크게 개선된 FDE를 이용한 본 연구결과는 이온화식에 비해 광전식에서 보다 큰 차이가 발생되었음을 추측할 수 있다.

본 연구결과를 통해 도출될 수 있는 향후 연구내용으로서, 개선된 FDE를 통해 변경된 Heskestad 및 Cleary 모델의 입력인자가 실제 감지기 작동시간에 미치는 영향에 관한 입력인자들의 민감도 분석이 수행되어야 할 것이다. 또한 가연물의 종류, 연기입자 및 색상에 따라 감지기의 반응특성이 변화될 수 있기에, 국내 PBD에서 주로 인용되고 있는 가연물을 대상으로 다양한 감지기에 대한 입력인자 DB 구축이 시급하게 이루어져야 할 것이며, 이를 위한 추가적인 연구가 수행될 예정이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 선행연구<sup>(4,5)</sup>를 통해 검토된 이온화식 및 광전식 연기감지기를 대상으로, 보다 정확한 FDS 기반의 연기감지기 수치모델의 입력인자를 도출하기 위하여 기존 화재감지기 시험장치(FDE)를 개선시켰다. 이를 통해 선행 연구결과와 수정·보완된 연기감지기 수치모델 입력인자를 제공하고자 한다. 본 연구결과는 화재시뮬레이션을 이용한 감지가 작동시간 및 RSET의 정확한 예측을 통해 국내 PBD의 신뢰성 향상에 유용할 것으로 기대된다. 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 기존 FDE의 유동 균일성을 개선시키기 위하여 추가적인 메쉬층이 설치되었으며, 난류강도의 감소를 위하여 Suction type의 유동장이 적용되었다. 또한 유속 및 광학적 연기밀도의 측정 정확도를 개선시키기 위하여, 감지기를 포함한 측정 위치들이 천장에서 덕트 중앙으로 변경되었다. 마지막으로 연기입자의 전방산란으로 인한 광소멸률 측정오차를 저감시키기 위하여 광 경로길이가 0.6 m에서 1.8 m로 증가되었다.

(2) 개선된 FDE를 이용하여 Heskestad 및 Cleary 연기감지기 수치모델의 입력인자들을 측정된 결과, 기존 FDE를 통해 제시된 결과와 정량적으로 상당한 차이를 보이고 있다. 특히 이온화식에 비해 광전식 연기감지기에서 보다 큰 정량적 변화가 발생됨을 확인하였다.

(3) 이온화식 및 광전식 연기감지기의 작동원리를 고려할 때, 감지기 작동과 연관된 입력인자들은 가연물, 연기입자 및 색상에 따라 큰 차이를 보일 수 있다. 따라서 국내 PBD에 적용되는 주요 가연물을 대상으로 연기감지기 입력인자 DB 구축이 시급하게 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한 감지기 작동시간에 대한 다양한 입력인자들의 민감도 분석결과가 제공되어야 할 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 국민안전처 소방안전119구조·구급기술연구개발사업 (MPSS-소방안전-2015-66)의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## References

1. J. H. McGuire and G. T. Tamura, "Simple Analysis of Smoke Flow Problems in High Rise Buildings", *Fire Technology*, Vol. 11, pp. 15-22 (1975).
2. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, "Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide", NIST Special Publication 1018, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (2015).
3. S. Baek, J. H. Choi, W. H. Hong and J. J. Jung, "A Study on Required Safe Egress Time (RSET) Comparison and Error Calculation in Relation to Fire Room Range Set Conditions of Performance Based Fire Safety Designers", *Fire Science and Engineering*, Vol. 30, No. 3, pp. 73-78 (2016).
4. K. H. Kim and C. H. Hwang, "Measurement of the Device Properties of a Ionization Smoke Detector to Improve Predictive Performance of the Fire Modeling", *Fire Science and Engineering*, Vol. 27, No. 4, pp. 27-34 (2013).
5. J. H. Cho, S. Y. Mun, C. H. Hwang and D. G. Nam, "Measurement of the Device Properties of Photoelectric Smoke Detector for the Fire Modeling", *Fire Science and Engineering*, Vol. 28, No. 6, pp. 62-68 (2014).
6. H. W. Park, J. H. Cho, S. Y. Mun, C. H. Park, C. H. Hwang, S. C. Kim and D. G. Nam, "Measurement of the Device Properties of Fixed Temperature Heat Detectors for the Fire Modeling", *Fire Science and Engineering*, Vol. 28, No. 1, pp. 37-43 (2014).
7. F. W. Mowrer, "Lag Times Associated with Fire Detection and Suppression," *Fire Technology*, Vol. 26, No. 3, pp. 244-265 (1990).
8. C. E. Marrion, "Lag Time Modeling and Effects of Ceiling Jet Velocity on the Placement of Optical Smoke Detectors", Master's Thesis, Worcester Polytechnic Institute, Center for Fire safety Studies, Worcester, MA (1989).
9. G. Heskestad, "Generalized Characterization of Smoke Entry and Response for Products of Combustion Detectors", *Proceedings of the Fire Detection for Life Safety Symposium* (1975).
10. T. Cleary, W. Grosshandler and A. Chernovsky, "Smoke Detector Response to Nuisance Aerosols", *International Conference on Automatic Fire Detection "AUBE '99"*, 11th, pp. 32-41 (1999).
11. T. Cleary and A. Chernovsky, "Particulate Entry Lag in Spot-Type Smoke Detectors", *Proceedings of 6th International Symposium, International Association for Fire Safety Science (IAFSS)* (1999).
12. G. W. Mulholland, E. L. Johnsson and M. G. Fernandez, "Design and Testing of New Smoke Concentration Meter", *Reprinted from the Fire and Materials*, Vol. 24, No. 5, pp. 231-243 (2000).
13. S. C. Kim, "Uncertainty Analysis of the Optical Smoke Density Measurement through the Doorway in a Compartment Fire", *Fire Science and Engineering*, Vol. 27, No. 2, pp. 75-79 (2013).
14. Y. Kametani, K. Fukagata, R. Orlu and P. Schlatter, "Effect of Uniform Blowing/Suction in a Turbulent Boundary Layer at Moderate Reynolds Number", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 55, pp. 132-142 (2015).
15. B. J. Kim, J. H. Cho, C. H. Hwang and S. H. Park, "A Study on the Development of a Low-cost Device for Measuring the Optical Smoke Density", *Fire Science and Engineering*, Vol. 29, No. 4, pp. 81-88 (2015).